

VŠB – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA

FAKULTA STROJNÍ - INSTITUT DOPRAVY

**Telemetrie bezpilotního prostředku pro měření parametrů přízemní
vrstvy atmosféry**

UAV Telemetry for Measuring of Atmosphere Ground Layer Parameters

Student:

Aleš Stuchlík

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. František Martinec, CSc.

Ostrava 2014

Zadání bakalářské práce

Student:

Aleš Stuchlík

Studijní program:

B3712 Technologie letecké dopravy

Studijní obor:

3708R036 Technologie letecké dopravy

Téma:

Telemetrie bezpilotního prostředku pro měření parametrů přízemní
vrstvy atmosféry
UAV Telemetry for Measuring of Atmosphere Ground Layer Parameters

Zásady pro vypracování:

1. Analýza současného stavu řešení problému
2. Analýza pohonných jednotek a metrologických systémů pro měření parametrů přízemní vrstvy atmosféry
3. Výběr pohonných jednotek vhodné technologie pro přenos dat na UAS pro měření parametrů přízemní vrstvy atmosféry
4. Návrh pohonné jednotky a vhodné technologie pro přenos dat na UAS pro měření parametrů přízemní vrstvy atmosféry
5. Částečná realizace pohonu a přenosu dat na UAS pro měření parametrů přízemní vrstvy atmosféry

Seznam doporučené odborné literatury:

Volner, R.: Digitální technologie – Elektronické přístrojové systémy, Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2007.

http://cs.wikipedia.org/wiki/Bezdr%C3%A1tov%C3%A1_komunikace

<http://cs.wikipedia.org/wiki/MEMS>

http://www.st.com/web/catalog/sense_power/FM89

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. František Martinec, CSc.**

Datum zadání: 17.02.2014

Datum odevzdání: 19.05.2014



doc. Ing. Aleš Slíva, Ph.D.
vedoucí katedry

doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 12. března 2014

Podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на вѣдомі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 12. března 2014

Podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce:

Aleš Stuchlík

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Štramberská 1127/28,

Kopřivnice 74221

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

STUHLÍK, A. Telemetrie bezpilotního prostředku pro měření parametrů přízemní vrstvy atmosféry: Bakalářská práce. Ostrava: VŠB – Technická Univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Institut dopravy – Ústav letecké dopravy, 2014, 51s.

Vedoucí práce: Ing. František Martinec, CSc.

Bakalářská práce se zabývá volbou vhodné pohonné jednotky pro bezpilotní prostředek, který slouží k monitorování znečištění přízemní vrstvy atmosféry. Dále se zabývá volbou vhodné datové komunikaci pro přenos naměřených meteorologických veličin a video signálu z kamery letounu. Práce se zabývá také volbou technologie, která by tuto komunikaci zajišťovala. Výstupem této práce je reálné zabudování zvolené pohonné jednotky do bezpilotního prostředku, zabudování zvolené komunikační technologie a zajištění správné datové komunikace.

ANNOTATION OF BACHALOR THESIS

STUHLÍK, A. UAV Telemetry for Measuring of Atmosphere Ground Layer Parameters: Bachelor thesis. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Institute of Transport – Department of Air Transport, 2014, 51p.

Thesis head: Ing. František Martinec, CSc.

The bachelor thesis deals with the selection of a suitable powerplant for unmanned system used to measure pollution in ground layer of the atmosphere. It also deals with selecting appropriate data communication for transmission of measured meteorological variables and the video signal from the plane's camera. The work also addresses the selection of technologies that would ensure this communication. The outcome of this work is the fitting of selected powerplant unit into UAV, fitting selected communication technology and ensuring proper data communication.

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat mému vedoucímu panu Ing. Františku Martincovi, CSc. za vedení, konzultace a pomoc při tvorbě této práce.

Dále bych chtěl poděkovat panu doc. Ing. Petru Jančíkovi, Ph.D. za možnost podílet se na tvorbě bezpilotního prostředku, který slouží pro monitorování znečištění přízemní vrstvy atmosféry.

Poděkování patří i všem členům týmu. Kristýně Lešenarové, Janu Bojkovi a Tomáši Zavackému, díky kterým mohl být celý projekt zrealizován a dotažen do zdárného konce.

Obsah

1. CÍLE PRÁCE	9
2. ÚVOD	10
3. ANALÝZA SOUČASNÉHO STAVU BEZPILOTNÍCH PROSTŘEDKŮ	12
3.1. BEZPILOTNÍHO PROSTŘEDEK OK-VSB-002	14
4. POHONNÁ JEDNOTKA UAS	16
4.1. ANALÝZA POHONNÝCH JEDNOTEK	18
4.2. VÝBĚR POHONNÉ JEDNOTKY	20
4.2.1. <i>Základní požadavky na pohonnou jednotku</i>	21
4.2.2. <i>Doplňkové požadavky na pohonnou jednotku</i>	24
4.3. NÁVRH POHONNÉ JEDNOTKY	26
4.4. ZABĚHNUTÍ POHONNÉ JEDNOTKY NA REÁLNÉM MODELU	28
4.5. VYHODNOCENÍ ZVOLENÉ POHONNÉ JEDNOTKY	28
4.6. PROVEDENÍ OPATŘENÍ PRO OPTIMÁLNÍ PRÁCI S DANOU POHONNOU JEDNOTKOU ..	29
5. DATOVÁ KOMUNIKACE UAS.....	31
5.1. TEORIE METROLOGIE, TELEMETRIE A INFORMACE	31
5.2. ANALÝZA METROLOGICKÝCH SYSTÉMŮ PRO MĚŘENÍ PARAMETRŮ PŘÍZEMNÍ VRSTVY ATMOSFÉRY	32
5.3. VÝBĚR VHODNÉ TECHNOLOGIE PRO PŘENOS DAT	34
5.3.1. <i>Základní požadavky na přenos dat</i>	36
5.3.2. <i>Doplňkové požadavky na přenos dat</i>	37
5.4. NÁVRH VHODNÉ TECHNOLOGIE PRO PŘENOS DAT	38
5.5. REALIZACE PŘENOSOVÝCH SOUSTAV	42
5.5.1. <i>Testování přenosu dat</i>	42
5.5.2. <i>Přizpůsobení danému modelu UAS</i>	43
5.6. VYHODNOCENÍ ZVOLENÉ TECHNOLOGIE	45
5.7. PROVEDENÍ OPATŘENÍ PRO OPTIMÁLNÍ PRÁCI S DANOU TECHNOLOGIÍ	47
6. ZÁVĚR.....	48
7. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	49
8. SEZNAM PŘÍLOH	51

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

Zkratka	České tvar	Anglický tvar
UAS	Bezpilotní systém	Unmanned aerial system
UAV	Bezpilotní letoun	Unmanned aerial vehicle
PJ	Pohonná jednotka	Powerplant
MSA	Mezinárodní standardní atmosféra	International standard atmosphere
WiFi	Bezdrátová komunikace pracující na standardu IEEE 802.11	Wireless communication working standard IEEE 802.11
Li-pol	Lithium-polymerová baterie	Lithium-polymer battery
ISM	Průmysl, věda, zdravotnictví	Industrial, scientific and medical
ČTU	Český telekomunikační úřad	Czech telecommunication office
ppm	Částí v milionu (1% = 10 000 ppm)	Parts per million (1% = 10 000 ppm)
ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav	Czech hydrometeorological institute

1. Cíle práce

Cílem bakalářské práce je zvolit vhodnou pohonnou jednotku pro bezpilotní prostředek, který je určen pro měření znečištění ovzduší v přízemní vrstvě atmosféry. Následně zvolenou pohonnou jednotku umístit na model a provést pozemní a letové zkoušky, zda zvolená pohonná jednotka vyhovuje všem požadavkům, případně zvolit patřičná opatření, pro zajištění správného fungování.

Dalším cílem této práce je na základě vstupních požadavků vybrat vhodnou datovou komunikaci pro přenos naměřených meteorologických veličin a video signálu z kamery letounu. Zvolit jak vhodnou datovou komunikaci, tak vhodnou technologii, která bude tuto komunikaci zajišťovat. Provést měření a testování zvoleného systému na reálném modelu a provést případná opatření pro správnou funkčnost.

Pro dosažení těchto cílů jsem použil několik metod. Od analytických, přes teoretické a praktické.

2. Úvod

Stálé překračování limitů obsahu znečišťujících látek v ovzduší na Ostravsku, vede řadu odborníků k zabývání se tímto problémem. Základem pro vyhodnocení a návrh opatření ke snížení znečištění je shromažďování informací formou měření.

V rámci jednoho z mnoha školních projektů, zaměřených na tuto problematiku, jsem dostal možnost zapojit se do týmu, který se zabývá návrhem a realizací bezpilotního prostředku pro měření znečištění přízemní vrstvy atmosféry. Úkolem bylo vytvořit takový prostředek, který bude schopen provádět letová měření a monitorovat šíření znečištění v příslušné oblasti.

Prostředek má být koncipován tak, aby pomocí meteorologických snímačů shromažďoval informace o teplotě, vlhkosti, koncentraci oxidu uhelnatého a množství polétavých částic PM10. Tyto data musí být nejen zaznamenávána pro pozdější vyhodnocení, ale musí být také v reálném čase vysílána na pozemní stanici pro lepší plánování měření. Cela konstrukce prostředku a funkce jednotlivých systémů tak musely být podřízeny právě těmto požadavkům.

Součástí bude také kamera, která poskytuje obslužnému personálu obrazovou informaci o prostředí, ve kterém se prostředek právě nachází. K této obrazové informaci jsou pomocí palubního systému přidávány údaje o poloze, výšce, rychlosti, kurzu a stavu palubních zdrojů. Prostředek je dále vybaven systémem automatického řízení, který z různých snímačů získává údaje, ty vyhodnocuje a na jejich základě je pak schopen provádět autonomní let. Tomuto systému je podřízeno samotné řízení prostředku pilotem. Systém je schopen v případě výpadku přenosu doletět zpět na místo startu a provést přistání. Jedná se tak i o bezpečnostní prvek.

Na tvorbě prostředku se podílí tým tvořený jak akademickými pracovníky, tak studenty. Vedoucím projektu je doc. Ing. Petr Jančík Ph.D. z katedry Ochrany životního prostředí v průmyslu. Konstrukce prostředku byla zadána kolegyni Kristýně Lešenarové. Elektroinstalaci, řízení letounu a snímání meteorologických veličin navrhoval kolega Jan Bojko. Mým úkolem bylo zvolit vhodnou pohonnou jednotku, přenosové systémy a navrhnout pozemní stanice a kolega Tomáš Zavacký celý prostředek ošetřil po legislativní stránce, vytvořil potřebnou dokumentaci a má na starost samotné zpracování a vyhodnocení naměřených údajů.

V první kapitole se práce zabývá analýzou současného stavu bezpilotních prostředků, především se zaměřením na prostředky, které slouží k monitorování znečištění ovzduší a dalších meteorologických veličin. Zmíněn je také prostředek, ze kterého vycházel konstrukční návrh. Samostatnou podkapitolu pak tvoří popis námi konstruovaného letounu OK-VSB-002.

Druhá kapitola je věnována pohonné jednotce prostředku. Zde je nejprve teoreticky popsáno působení pohonné jednotky na letoun a rozdělení pohonných jednotek, které se v současné době používají. Další část tvoří analýza současného stavu, především stanovení požadavků, které jsou na pohonnou jednotku kladeny. Z této analýzy pak vychází praktická volba pohonné jednotky, její zakomponování na letoun, zaběhnutí a vyhodnocení. V závěru této kapitoly jsou zmíněny některé incidenty spojené s pohonnou jednotkou a následné opatření, které byly přijaty.

Třetí kapitola řeší datovou komunikaci prostředku. Teoreticky popisuje metrologické snímače, které jsou použity pro snímání meteorologických veličin. Následně obsahuje stanovení všech požadavků pro přenos informací, rozdělení do datových skupin a praktickou volbu datové komunikace pro jednotlivé skupiny. Poslední část kapitoly obsahuje vyhodnocení zvoleného řešení a provedení opatření pro optimální práci.

3. Analýza současného stavu bezpilotních prostředků

Na úvod je třeba říci, že bezpilotní prostředky sloužily v první řadě pro bojové účely. Jednalo se o vyspělejší formu zbraně, která byla schopna za poměrně nízké náklady napadnout nepřítele ze vzduchu, bez nutnosti lidské osádky.

První zmínky o bezpilotních prostředcích se datují do roku 1849, kdy Rakouské balóny naložené výbušninami napadaly Italská města. V průběhu První světové války se již poprvé začínají objevovat bezpilotní prostředky s rádiovým řízením. Ty byly také určeny pro bojové účely a to zejména k napadání vzducholodí.

V roce 1934 byl v Americe poprvé v historii otevřen obchod s rádiem řízenými modely, který se nazýval „*Reginald Denny Hobby Shops*“, který se brzy rozrostl a přejmenoval se na „*Radioplane Company*“. Tím se dostaly rádiem řízené modely poprvé do rukou široké veřejnosti.

V dnešní době má asi nejvíce rozvinutý projekt bezpilotních prostředků pro měření znečištění ovzduší University of California, San Diego ve spolupráci s Los Alamos National Laboratory. Tento projekt má za cíl vytvořit systém bezpilotních prostředků, které budou autonomně monitorovat šíření znečišťujících látek při různých událostech, jako jsou nehody chemických závodů, lesní požáry, sopečné činnosti a podobně [3].



Obrázek 3.1 – UAV pro monitorování šíření znečištění [3]

Mezi bezpilotní prostředky monitorující ovzduší lze zařadit také meteorologický balón. Ten používají hydrometeorologické ústavy po celém světě pro měření teploty, tlaku, vlhkosti a dalších veličin. Český hydrometeorologický ústav provádí takovéto měření každých 6 hodin na stanici Prostějov a Praha – Libuš.



Obrázek 3.2 – Meteorologický balón [4]

Koncepce našeho prostředku pro monitorování znečištění přízemní vrstvy atmosféry se zakládá na již funkční konstrukci České armády, konkrétně na konstrukci jejího bezpilotního prostředku Sojka III. V porovnání s americkým Predátorem je o poznání menší, její rozpětí činí něco málo přes 4 m a maximální rychlost se pohybuje kolem $180 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Je určena primárně pro monitorování a sběr optických informací, proto se zaměřuje na parametry jako je výdrž, anebo dolet, který je až 100 km.



Obrázek 3.3 – Sojka III [12]

V dnešní době asi nejvíce se rozvíjející kategorií, jsou bezpilotní prostředky pro zábavu a letecké práce. Dříve nebylo toto odvětví rozšířeno v tak hojném počtu především kvůli dostupnosti dílů, polotovarů, materiálu a ceně. To je dnes už minulostí a proto se můžeme čím dál častěji setkávat s leteckými záběry právě z bezpilotních prostředků.

Asi nejambicióznější cíle má s bezpilotními prostředky firma Amazon, která chce s jejich pomocí doručovat zákazníkům drobné zásilky až před dveře jejich domu. Dalšími průkopníky jsou společnosti Facebook a Google, kteří chtějí pomocí bezpilotních prostředků, využívajících solární energii, šířit internet do špatně přístupných oblastí.

3.1. Bepilotního prostředek OK-VSB-002

Projekt bezpilotního prostředku pro měření znečištění přízemní vrstvy atmosféry vznikl díky potřebě přesnějšího monitorování šíření znečišťujících látek v Moravskoslezském kraji.

Základním požadavkem je měření různých meteorologických veličin, především teploty, vlhkost, CO a polétavých částic PM10. Tyto veličiny mají být monitorovány od místa nejvyšší koncentrace dále ve směru šíření a to jak vertikálně tak horizontálně. Vzhledem k tomuto byl stanoven další požadavek a to na celkovou dobu jednoho měření, které musí probíhat alespoň 30 minut a musí zmapovat větší oblasti.

Z těchto požadavků se vycházelo při konstruování a celkové koncepci prostředku. Díky potřeba zmapovat větší oblasti, celkové době měření a nenáročnosti na řízení, byla zvolena konstrukce letounu s hornoplošným uspořádáním. Měřicí přístroje jsou umístěny v přidi, aby docházelo k minimálnímu ovlivnění proudu vzduchu do nich vstupujících. To také určilo, že letoun bude poháněn tlačnou vrtulí. Všechny tyto požadavky byly zohledněny, a proto se přistoupilo ke konstrukčnímu návrhu ve stylu Sojka III Armády České Republiky.

Technické parametry letounu OK-VSB-002

Rozpětí	3,00 m
Délka	1,80 m
Výška	0,62 m
Plocha křídel	1,14 m ²
Maximální plošné zatížení	80 g·dm ⁻²
Hmotnost	
prázdná	5,2 kg
vzletová	8,0 kg
maximální užité zatížení	2,8 kg
Maximální rychlost	100 km·h ⁻¹
Maximální dolet	5000 m
Dolet s max. zátěží	5000 m

Zvolená koncepce a vzhled letounu je vidět na obrázku 3.4. Řídicí plochy mají červenou barvu a plochy, se kterými se často manipuluje, jsou modré. Na obrázku je patrné i vstupní ústrojí měřicích přístrojů v přední letounu.

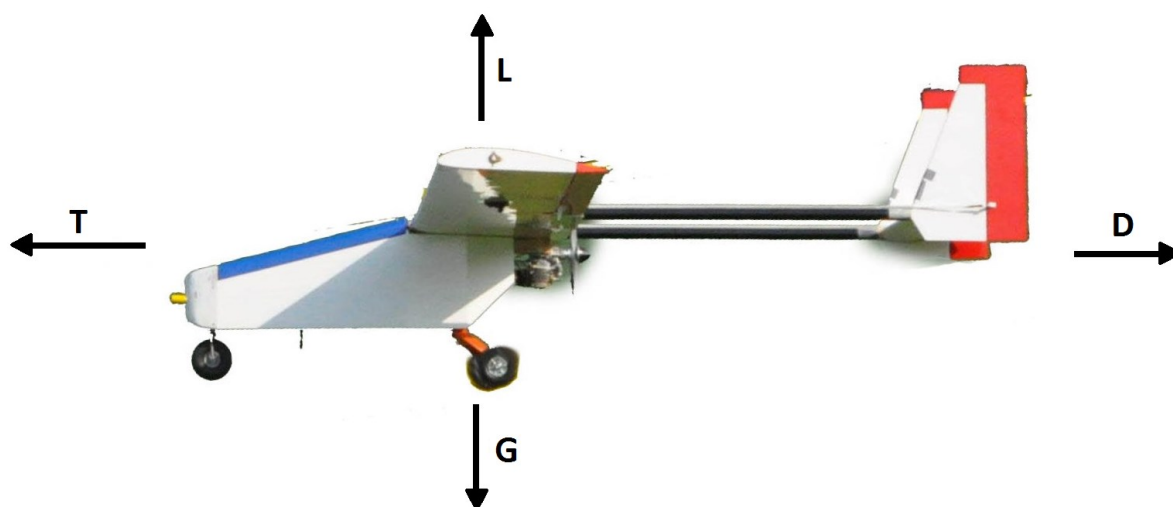


Obrázek 3.4 – Letoun OK-VSB-002

4. Pohonná jednotka UAS

Na letadlo za letu působí soubor mnoha sil, které pro zjednodušení shlukujeme do základních čtyř, jak je znázorněno na obrázku 4.1. Jedná se o tyto:

- G - tíhová síla,
- L - vztlak,
- D - odpor letadla,
- T - tah pohonné jednotky.



Obrázek 4.1 – Síly působící na letadlo

Aby letadlo bylo schopné samostatného letu, musí být vybaveno pohonnou jednotkou, která vyvozuje sílu překonávající odpor prostředí – **Tah**. Obecně lze tah definovat jako sílu, kterou pohonná jednotka působí na letadlo. Pokud má letadlo více pohonných jednotek, jedná se o součet tahů jednotlivých jednotek.

Tah vzniká jako důsledek urychlování proudu vzduchu pohonnou jednotkou. Vzhledem k rychlostem letu turistických i sportovních letounů, lze vzduch považovat za nestlačitelný a měrná hmotnost se nemění. Na základě zákona o změně hybnosti a principu akce a reakce byl odvozen vztah pro výpočet velikosti tahu [1].

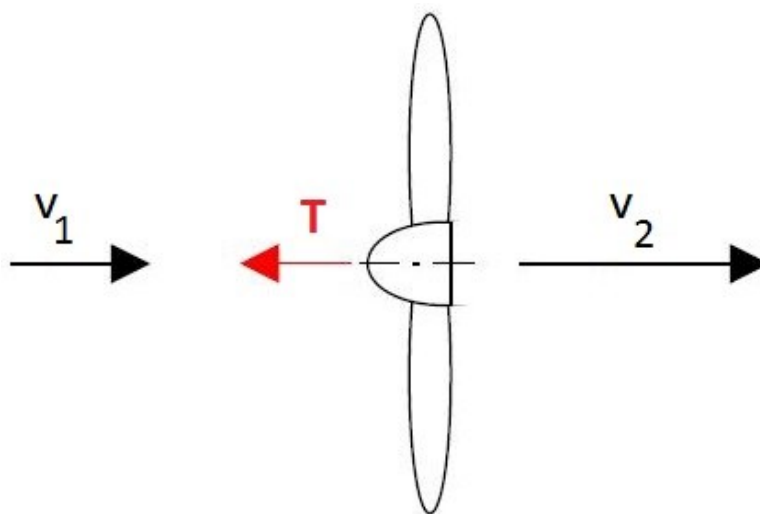
$$T = m_s * (v_2 - v_1)$$

T – tah

m_s – hmotností tok

v_2 – rychlost tekutiny za pohonnou jednotkou

v_1 – rychlost tekutiny vstupující do pohonné jednoty



Obrázek 4.2 – Vznik tahu

Hmotnostní tok je hmotnost tekutiny, která proteče daným průřezem za 1 sekundu. Protože hmotnostní tok je součinem rychlosti tekutiny - v , měrné hmotnosti - ρ a plochy daného průřezu - S , platí pro jeho výpočet vztah:

$$m_s = \rho \cdot v \cdot S$$

Výše uvedené vztahy jsou univerzální a platí pro všechny druhy pohonných jednotek (vrtulové, turbovrtulové, proudové i raketové), ale také pro všechny druhy tekutin (např. vzduch nebo voda). Kromě toho z těchto vztahů vyplývá, že stejného tahu lze dosáhnout velkým urychlením malého množství tekutiny nebo malým urychlením velkého množství tekutiny [1].

4.1. Analýza pohonných jednotek

Letadlové motory jsou odlišné od motorů, které se běžně používají v pozemních prostředcích. Jsou kladeny daleko větší nároky na jejich spolehlivost, kvalitu zpracování, nízkou hmotnost a další. Z konstrukčního hlediska bývají letadlové motory umístěny nejčastěji pod křídlem, nebo v trupu. Některé konstrukce umísťují motory také na zád letounu. V současné době se nejčastěji využívají pístové motory nebo spalovací turbínové motory. Existuje však velká spousta dalších typů pohonu, které se v letectví používají.

Rozdělení leteckých motorů [2]:

- pístové motory
- turbínové motory
 - turbokompresorové (jednoprúdové)
 - turbovrtulové
 - turbohrádelové
 - turbodmychadlové (dvouproudové)
 - propfan
- bezturbínové motory
 - náporové
 - náporové s nadzvukovým spalováním (SCRAMJET)
 - pulzační
- raketové motory
 - na kapalné pohonné látky
 - na tuhé pohonné látky
 - hybridní
- kombinované motory
 - motokompresorové
 - turbonáporové
 - turboraketové
- speciální motory
 - jaderné
 - elektrické

V následujících odstavcích si ke každé skupině řekneme základní informace a způsoby využití.

Pístový motor

Pístové spalovací motory jsou nejčastěji čtyř-dobé zážehové motory. Vrtule je poháněna z klikové hřídele přes reduktor. V minulosti se využíval výhradně tento typ pohonu, v dnešní době se využívá pro malá a sportovní letadla. Má jednoduchou konstrukci je poměrně spolehlivý a oproti spalovacím turbínám má také menší spotřebu.

Turbínové motory

V dnešní době asi nejvíce rozšířený typ motoru pro leteckou dopravu. Funguje na principu kontinuální práce, kde všechny cykly probíhají současně, tedy stlačení vzduchu v kompresorové části, hoření směsi leteckého paliva se vzduchem ve spalovací komoře a následná expanze na turbíně. Používá se v mnoha variantách, nejčastěji pro velká a střední dopravní letadla, helikoptéry a bojová letadla.

Bezturbínové motory

Tyto motory nevyužívají rotačního generátoru pro vytvoření stlačeného plynu. Tlakové energie se plynu dostává díky transformaci z energie kinetické, proto je jejich využití možné až při vyšších rychlostech. Ty začínají okolo rychlosti zvuku. Za nulové rychlosti nefungují. Tento problém postrádá motor pulzační, který spalovací komoru periodicky uzavírá a tak může k expanzi plynu docházet i za nulové rychlosti. V současné době se ve velkém nevyužívají.

Raketový motor

Raketový motor je výhodný pro dosažení nejvyšších rychlostí letu. Dále je výhodný pro použití v extrémních letových výškách, kde by mohl být nedostatek atmosférického kyslíku pro chod proudových motorů. Na druhou stranu má raketový motor nejnižší efektivitu, protože kromě paliva musí letoun nést i okysličovadlo nutné pro spalování. Pohon letounů pomocí raketového motoru není příliš obvyklý. Většinou se používá pouze pro experimentální letadla nebo jako doplňkový pohon v kombinaci s jiným z výše uvedených typů pohonů.

Kombinované motory

Jde o motory, které kombinují výhody několika skupin, jako jsou například pístové, turbínové, bezturbínové ale i raketové. Žádný z těchto motorů se však nepoužíval, s výjimkou turbonáporového. Tento motor využíval průzkumný letoun SR-71, který díky tomu dosahoval cestovní rychlosti 3 machy.

Speciální motory

S koncepcí speciálního leteckého motoru využívající jadernou reakci přišla Americká armáda během 2. Světové války. Motor byl založen na konstrukci klasického turbínového motoru s jediným rozdílem. Neobsahoval spalovací komoru. Místo toho byl plyn za kompresorem směřován do jádra reaktoru, kde došlo k jeho prudkému zahřátí a následně byl přiváděn zpět na turbínu. Tento motor však nebyl nikdy postaven kvůli nedořešenému stínění. Další, ještě stále řazený do skupiny speciální, je motor elektrický. V obchodní dopravě se tento motor zatím nevyužívá, ale bezpilotní prostředky a experimentální letouny je už dnes využívají v hojné míře. Především díky jejich spolehlivosti, nízké hmotnosti a možnosti získávat elektrickou energii i za letu prostřednictvím solárních článků.

4.2. Výběr pohonné jednotky

Při volbě pohonné jednotky si musíme hned v začátku uvědomit, k čemu budeme dané letadlo využívat. Především tak musíme zvážit, zda bude letadlo a tedy i pohonná jednotka, vykonávat jednoduchý, převážně vodorovný let nebo chceme s letadlem provádět akrobacii.

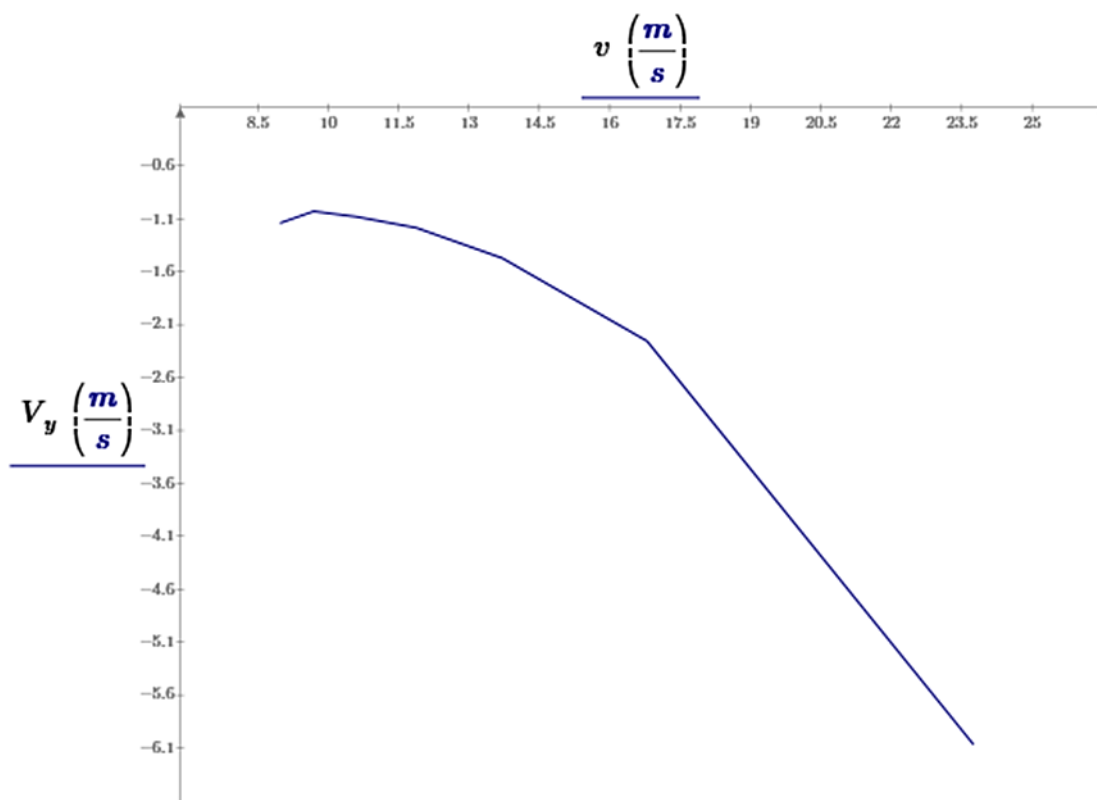
Další faktor, který musíme zohlednit, je celková konstrukce letadla. Pohonná jednotka na větroně bude dimenzována jinak než na stíhačky nebo dokonce helikoptéry.

Asi nejdůležitějším faktorem je velikost letadla a jeho celková hmotnost. Z tohoto se odvíjí požadovaný výkon pohonné jednotky. Nesmíme však zapomenout také na další parametry jakým je například rezerva výkonu, umístění pohonné jednotky na letadle, velikost a druh použitého média, které bude pohonná jednotka využívat jako zdroj energie. V ideálním případě bychom chtěli, aby bylo letadlo co nejvýkonnější a nejlehčí nebo naopak aby létalo co nejdéle s co možná největší hmotností. Mnohdy se volí kompromis.

V neposlední řadě se pohonná jednotka volí také s ohledem na zkušenosti obslužného personálu, personálu údržby a dostupných prostředcích.

4.2.1. Základní požadavky na pohonnou jednotku

Jedním ze základních požadavků je celková doba letu, čemuž musí s dostatečnou rezervou odpovídat i doba chodu motoru. Požadovaná doba letu byla stanovena na 30 minut. Dalším požadavkem je potřebný výkon motoru, který zajistí dostatečnou dopřednou rychlost při dané hmotnosti a odporu letounu.



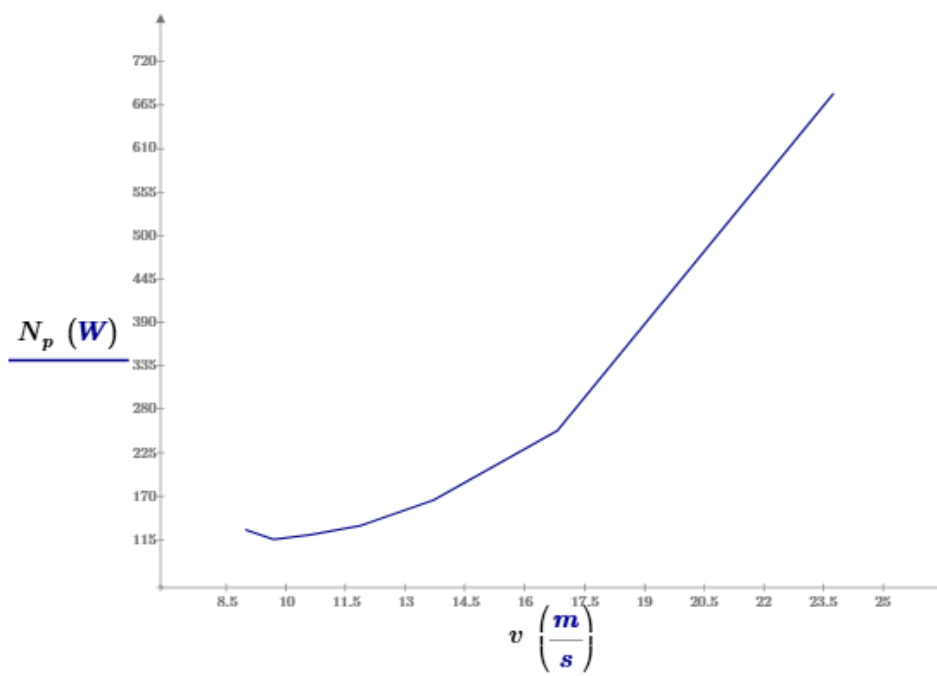
Graf 4.1 – Závislost rychlosti letu na opadání

Z rychlostní poláry modelu, která vychází z aerodynamických výpočtů kolegyně Lešenarové, vidíme, že nejmenší opadání má letoun při rychlostech 9 - 12 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, což odpovídá rychlostem 32 - 43 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$. Jelikož potřebujeme pokud možno co nejekonomičtější let s největší výdrží, bude se v tomto rozmezí pohybovat i cestovní rychlost.

Potřebný výkon motoru

Pro určení potřebného výkonu budeme také vycházet z aerodynamického výpočtu letounu kolegyně Lešenarové. Níže uvedený graf znázorňuje závislost potřebného výkonu pohonné jednotky na dopředné rychlosti při vodorovném letu.

$$N_p := G \cdot \frac{v}{K} \cdot \frac{1}{\eta} = \begin{bmatrix} 679.952 \\ 252.753 \\ 165.011 \\ 132.786 \\ 121.294 \\ 115.418 \\ 127.841 \end{bmatrix} \text{ W}$$



Graf 4.2 – Určení potřebného výkonu pro vodorovný let

N_p – potřebný výkon

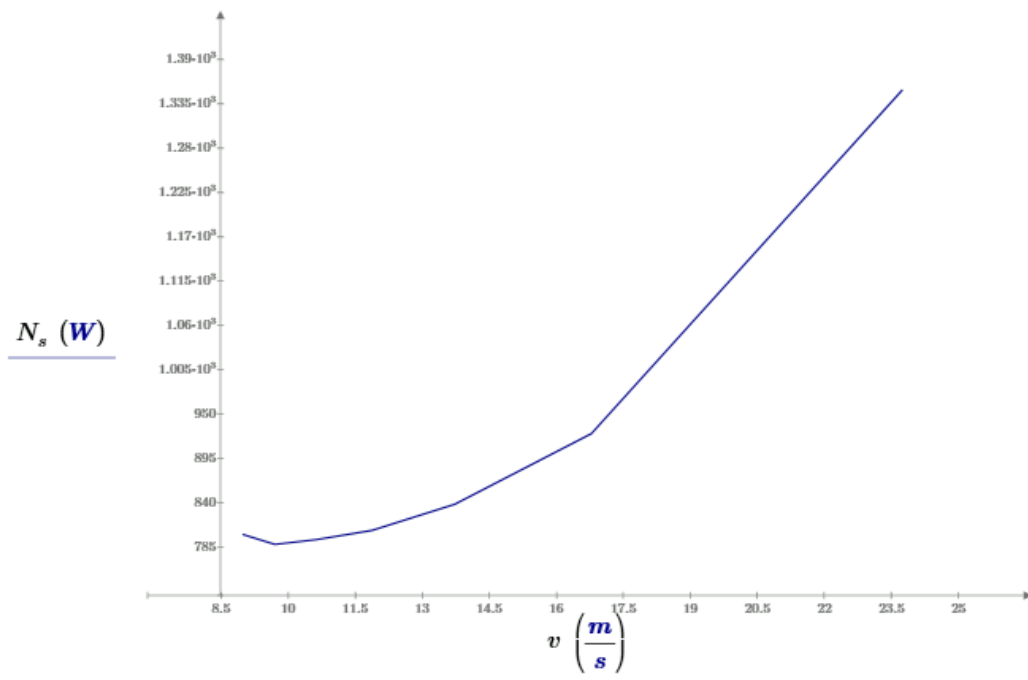
G – tíha

v – rychlost letu

K – klouzavost

η - účinnost vrtule

$$N_s := (W_y - V_y) \cdot \frac{G}{\eta} = \begin{bmatrix} 1.352 \cdot 10^3 \\ 925.209 \\ 837.467 \\ 805.242 \\ 793.75 \\ 787.874 \\ 800.297 \end{bmatrix} \text{ W}$$



Graf 4.3 – Určení potřebného výkonu pro stoupání

N_s – potřebný výkon pro stoupání

W_y – stoupací rychlost

V_y – klesavost

G – tíha

η - účinnost vrtule

Graf 4.3 ukazuje, že maximální požadovaný výkon pro stoupání je 1,352 kW. Na tuto hodnotu budeme navrhovat motor.

Umístění motoru

Motor bude již z návrhu konstrukce umístěn v zadní části trupu mezi dvěma nosníky, které spojují trup s ocasními plochami. Jedná se tak o tlačné uspořádání. Hlavním aspektem, který je třeba při umístění zohlednit, je prostor pro vrtuli. Ta je limitována především vzdáleností osy klikové hřídele od země, ale také roztečí nosníků vycházejících z křídel.

Vektor tahu motoru bude v podélné ose letounu a s touto osou nebude svírat žádný úhel.

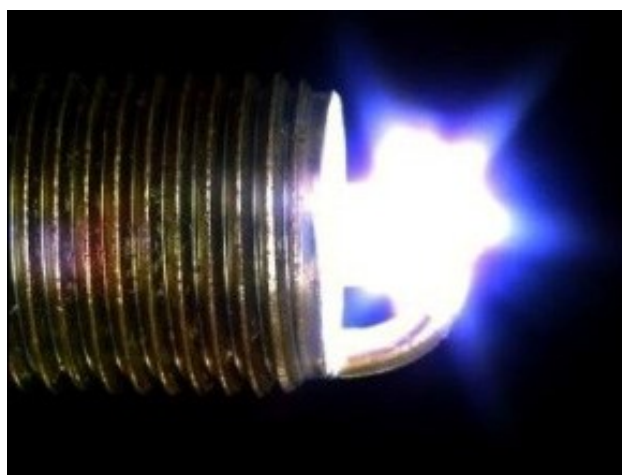
4.2.2. Doplnkové požadavky na pohonnou jednotku

Na pohonnou jednotku jsou kladeny i další požadavky, které nesouvisí přímo s pohonem letounu. To však neznamená, že nejsou důležité a nemusíme je brát v potaz.

Jelikož se jedná o letoun určený primárně k měření, musí tomu všechny části podléhat. Proto musí být i motor zvolen tak, aby to samotné měření a vysílání informací neovlivňovalo.

Ovlivňování přístrojů UAS pohonnými jednotkami

Při uvažování o spalovacím motoru musíme brát v potaz fakt, že pro zapálení směsi se u zážehových motorů používá elektrický výboj na svíčce.



Obrázek 4.3 – Elektrický výboj na svíčce

Pro vyvolání přeskočení elektrického náboje mezi katodou a anodou se používá vysokých hodnot napětí. Tyto hodnoty se pohybují mezi 12 – 25 kV a někdy i více.

V takovém případě by docházelo na palubě v bezprostřední blízkosti měřicích a komunikačních zařízení k vysokonapětovým výbojům. Pro výpočet frekvence výbojů použijeme jednoduchý vzorec, který ukazuje závislost frekvence na otáčkách motoru - n . Uvažujeme zážehový dvoutaktní motor s otáčkami v rozmezí 1 600-14 000.

$$f = \frac{n}{2} = \frac{233}{2} \cong 117Hz$$

Při maximálních otáčkách by tak docházelo 117x za sekundu k tomuto vysokonapětovému výboji. To by mělo negativní vliv na přenosové soustavy, které pracují na frekvencích 433MHz, 2,4GHz a 5,8GHz.

Údržba motoru

V neposlední řadě je třeba myslet také na údržbu motoru. Ten daleko více, než všechny ostatní součásti modelu podléhá opotřebení a tak musí být jeho stav udržován vždy v nejlepší kondici. To znamená pravidelně jej udržovat.

Elektrické motory používané na modelech jsou bezesporu na údržbu jednodušší a nejsou tak náchylné na opotřebení jako spalovací motory.

Spalovací motory, ať už benzínové nebo metylalkoholové jsou na opotřebení náchylnější a také je třeba dodržovat určité zásady při jejich chodu. Především tak správné mazání. U dvoudobých motorů mažeme motor prostřednictvím oleje, obsaženém v palivu. Pro správné zaběhnutí motoru musí palivo z počátku obsahovat větší koncentraci oleje. Motor sice bude vypouštět daleko větší množství zplodin, právě díky spalování oleje, ale pro správnou funkci motoru i v budoucnu je třeba jej zpočátku takto zaběhnout. Správné složení směsi by měl vždy určit výrobce motoru.

Celkově by měl být motor snadno přístupný, protože je potřeba jej čas od času zkontrolovat, seřídít a případně i demontovat. Zároveň musí být ale motor s modelem pevně spojen, protože by vibrace vzniklé za běhu mohly uvolnit uložení a tím by mohlo dojít k závažným problémům. Motorové lože je proto velmi důležitou částí konstrukce.

4.3. Návrh pohonné jednotky

Při návrhu pohonné jednotky se vybíralo z několika typů motorů, které se pro bezpilotní prostředky využívají. Byly porovnány jejich největší klady a zápory, vzhledem ke všem požadavkům, které jsou na pohonnou jednotku kladeny.

Typ motoru	Klady	Zápory
Benzínový	Nízká spotřeba a cena paliva Jednoduchost	Ovlivňuje elektrické přístroje Vyšší hmotnost
Metylalkoholový	Vysoká účinnost Neovlivňuje elektrické přístroje	Dražší palivo Produkce emisí při spalování směsi paliva a oleje
Turbínový	Vysoký výkon	Velké letové rychlosti Vysoká spotřeba
Bezturbínový	Vysoký výkon Nízká hmotnost	Složitá konstrukce Nespolehlivé
Elektrický	Spolehlivé Žádné vibrace	Ovlivňování elektrických přístrojů

Tabulka 4.1 – Klady a zápory jednotlivých typů motorů

Při zohlednění všech požadavků, které jsou na pohonnou jednotku kladeny, byl zvolen dvoudobý letecký vznětový spalovací metylalkoholový motor **Magnum XL-91 AIISR**.

Technická data motoru

Objem	0.91 L (14,95 cm ³)
Vrtání	27,7 mm
Zdvih	24,8 mm
Celková hmotnost	714 g
Výbrus	ocelová vložka, píst Al s kroužkem
Rozměr vrtule	13 x 7 - 15 x 6
Palivo	metylalkohol + ricínový olej
Zapalování	žhavicí svíčka
Tlumič	Dvoukomorový
Svíčka	ASP Glow Plug GP-1
Rozsah otáček	2 000 - 15 000 ot/min
Průměrná spotřeba paliva	900 ml/hodinu
Výkon	2,1 kW při 14 000 ot/min
Karburátor	Dvoujehlový

Tabulka 4.2 – Technická data motoru Magnum XL-91 AIISR

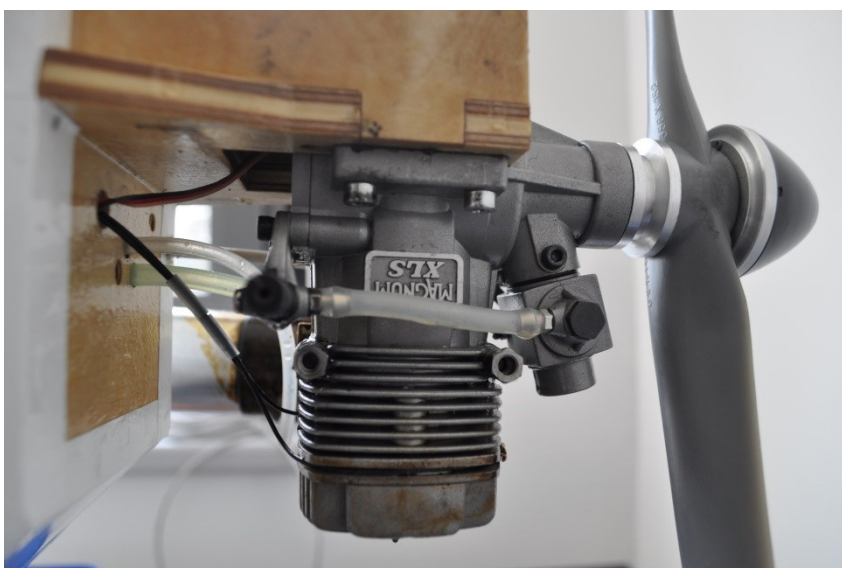
Vzhledem k zástavbovým rozměrům a doporučeným parametrům daných výrobcem motoru byla zvolena tlačná vrtule **APC C-2 14x6P** vyrobená z plastu.

Technická data vrtule

Materiál	PVC Plast
Hmotnost	46 g
Rozměry	356 x 152 mm
Otvor	8 mm
Provedení	Tlačná
Určení	Sportovní

Tabulka 4.3 – Technická data vrtule APC C-2 14x6P

Motor je umístěn na vyztuženém motorovém loži orientován motorovou hlavou směrem k zemi. Uchycen pomocí 4 šrouby s válcovou hlavou a drážkou Imbus DIN912, jak je vidět na obrázku 4.4. Vyvedení výfukového potrubí z motoru do tlumiče muselo být z důvodu konstrukčního provedení trupu prodlouženo o 20 mm pomocí hliníkové podložky, aby nedošlo ke kontaktu výfukového tlumiče s potahem letounu.



Obrázek 4.4 – Umístění motoru na letounu

Protože se jedná o vznětový motor, podobně jako motory diesellové, musí být spalovací prostor před nastartováním přehřát. K tomu slouží žhavicí svíčka **ASP Glow Plug GP-1**. Jelikož motor nemá svůj elektrický okruh, tak musí být elektrická energie, kterou svíčka k přehřátí potřebuje dodána pomocí externího zdroje tzv. „žhavítka“.

4.4. Zaběhnutí pohonné jednotky na reálném modelu

Při zaběhnutí pohonné jednotky se postupovalo dle pokynů daných výrobcem motoru. Takto bylo provedeno několik motorových zkoušek (viz. Příloha 3).

Postup zaběhnutí motoru Magnum XL 15 ccm

- | | |
|--|---|
| 1. Prověření všech spojů a uložení | 11. Umístění startéru na vrtulový kužel |
| 2. Prověření palivového potrubí | 12. Start motoru |
| 3. Uzavření palivového kohoutu | 13. Odstranění startéru |
| 4. Načerpání paliva do palivové nádrže | 14. Stažení plynu na volnoběh |
| 5. Otevření palivového kohoutu | 15. Odstranění žhavení |
| 6. Seřízení palivové jehly pro start | 16. Seřízení palivové jehly pro běžný chod |
| 7. Uzavření sání stažením plynu do minimální polohy | 17. Běh motoru na volnoběh po dobu několika minut |
| 8. Nasátí paliva do spalovací komory protočením motoru přes vrtuli | 18. Postupné zvyšování otáček až k maximálním po dobu několika sekund |
| 9. Umístění žhavení na žhavicí svíčku | |
| 10. Nastavení plynu na zvýšený volnoběh | |

4.5. Vyhodnocení zvolené pohonné jednotky

Motor byl umístěn na letoun a uchycen čtyřmi metrickými šrouby s válcovou hlavou a vnitřním šestihranem M6 ČSN 02 1143, jak je vidět na obrázku 4.4. Vrtule je upevněna na hřídel motoru pomocí duralové podložky a dvoudílné pojistné matice M14 ČSN 02 1491. Toto spojení je zakryto vrtulovým kuzelem z plastu.

Plastová **nádrž o objemu 0,7 l** je umístěna v centroplánu letounu a pomocí palivových hadic je palivo přiváděno přes palivovou jehlu do motoru.

Motorové zkoušky probíhaly v budově institutu environmentálních technologií v Ostravě – Porubě. Těmito zkouškami byla ověřena maximální doba chodu motoru při plné nádrži, která je následující:

- **5 minut** stoupání při maximálních otáčkách $15\,000\,ot \cdot min^{-1}$,
- **32 minut** chodu na zvýšený volnoběh při otáčkách $4000\,ot \cdot min^{-1}$.

V příloze 3 je vidět motorová zkouška na institutu environmentálních technologií ze dne 14. 2. 2014. Veškeré záznamy o dosavadním chodu motoru jsou vedeny v letovém deníku, který je v příloze 5.

Motor vykazoval ze začátku nestabilní chod. Po zaběhnutí motoru, které trvalo přibližně 60 minut čistého času, už tento problém odezněl. Následný zálet letounu prokázal, že zvolený motor poskytuje dostatečný výkon, jak při vodorovném ustáleném letu, tak při stoupání a to s dostatečnou rezervou výkonu. Toto potvrdil i zkušební pilot, který vlastnosti a chování letounu testoval. Záběry ze záletu v Hati ze dne 24. 4. 2014 jsou v příloze 4.

Pro start při maximální vzletové **hmotnosti 8 kg** je zapotřebí dráha o minimální **délce 12m**. Stoupání při maximálním výkonu překračuje požadavek **$6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$** .

Opakované zálety prokázaly, že pro vodorovný ustálený let stačí **volnoběžné otáčky $2500 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$** , což výrazně snižuje spotřebu paliva a tak prodlužuje maximální dobu letu. Maximální doba letu při těchto podmínkách se nyní pohybuje na hranici **50 minut**. To však přináší i velké nebezpečí a to je podchlazení motoru.

V případě chodu na volnoběžné otáčky po delší dobu motor začal vykazovat nestabilní práci, která vedla až k jeho zastavení. Došlo tak kvůli podchlazení motoru, který už při stlačení směsi neměl dostatečnou teplotu pro správné vznícení. Proto je třeba při letu pravidelně zvyšovat a následně snižovat otáčky, aby motor udržoval vždy správnou provozní teplotu.

4.6. Provedení opatření pro optimální práci s danou pohonnou jednotkou

1. incident

Při motorových zkouškách a záletech byla zjištěna netěsnost na výfukovém potrubí. To mělo za následek únik nespáleného oleje skrz netěsnosti. Výsledkem tak bylo znečištění celého motoru, části trupu a ocasních ploch. Netěsnost byla odstraněna dotažením všech uvolněných spojů, pojištěním spojů proti dalšímu uvolnění a přetmelením spojů kamnářským tmelem, který je určen pro utěsnění spojů na částech vystavených vysokým teplotám.

2. incident

Dalším zjištěným problémem bylo nedostatečné orientování proudu výfukových zplodin. Ty se dostávaly od motoru až ke střední části trupu a vznikly tak obavy z ovlivnění meteorologických snímačů. Proto byla na tlumič výfuku dodatečně umístěna hadice odvádějící výfukové plyny pod podvozek letounu a dále za letoun.

3. incident

Nejzávažnějším problémem byly vibrace motoru, které způsobovaly velké namáhání závitové tyče v tlumiči výfuku. Tento problém byl však skrytý. Tyto vibrace při třetím záletu v Hati dne 23. 4. 2014 způsobily únavový lom na závitové tyči a uvolnění tlumiče výfuku od motoru. Na chod motoru to však mělo minimální vliv a pilot byl schopen provést nouzové přistání bez poškození letounu. Tlumič výfuku zůstal zaklíněn s výfukovou hadicí na podvozku letounu a uvolnil se až při dosednutí na dráhu jak je vidět v příloze 6. Problém s vibracemi motoru odstranit nejde, proto byla původní závitová tyč nahrazena vysoko-pevnostní o větším průměru.



Obrázek 4.5 – Poškozený tlumič výfuku

5. Datová komunikace UAS

Tato kapitola se zabývá datové komunikací prostředku. Věnuje se metrologickým snímačům, pro měření parametrů přízemní vrstvy atmosféry a technologiím přenosu informací mezi pozemní stanicí a letounem.

5.1. Teorie metrologie, telemetrie a informace

Metrologie

Metrologie je vědní obor zabývající se způsobem měření a měřením samotným různých fyzikálních, chemických, technických a jiných veličin. Zakládá se na standardech, jako jsou například jednotky soustavy SI. Dohled nad metrologií je realizován Mezinárodním úřadem pro míry a váhy a standardizaci zabezpečuje Mezinárodní organizace pro zákonnou metrologii a akreditaci organizace Mezinárodní spolupráce pro akreditaci zkušebních a kalibračních laboratoří.

Telemetrie

Telemetrie je způsob dálkového měření a přenosu informací. Je to složenina dvou řeckých slov tele – vzdálený a metron – měřidlo.

Jak by mohl název zavádět, nejedná se pouze o bezdrátové měření, ale také měření, kde je informace přenášena pomocí optických spojů, počítačových sítí a dalších drátových komunikací. Nejčastěji se však telemetrie spojuje s bezdrátovým měřením pomocí rádiového, magnetického, infračerveného a jiného signálu.

Informace, zpráva, signál. [5, 6]

Získávání informací je proces probíhající mezi příjemcem informace (člověkem, případně strojem) a zdrojem informace (okolní realitou). Je-li konečným příjemcem člověk, pak má informace obvykle charakter zprávy (tj. sdělení v určité formě). Zpráva se šíří daným prostředím díky nosiči – signálu.

Z hlediska vysílání, přenosu, příjmu a uchovávání zpráv lze obecně definovat signál jako fyzikální veličinu(y), v jejíchž některých parametrech je zakódována daná zpráva. Z uvedeného vyplývá, že obvykle je potřeba na straně příjemce provést závěrečnou konverzi přijatého signálu na přijatou zprávu (informaci). To je úkol

koncového zařízení (TV, reproduktor, dekodér). Z hlediska informace „nanesené“ na signálu není důležité, jak vlastní signál „vypadá“, z hlediska použitého prostředí šíření signálu však ano. Toho se běžně využívá při přenosu dat, kdy na trase od zdroje k příjemci signál často střídá řadu forem (analogový, digitální, elektromagnetická vlna, akustická vlna, laserový paprsek,...). Je však nutné zařídit, aby při konverzi jedné formy signálu v jinou zůstala zachována původní přenášená informace.

5.2. Analýza metrologických systémů pro měření parametrů přízemní vrstvy atmosféry

Na letounu jsou umístěny metrologické snímače, které měří některé z meteorologických veličin. Především se jedná o snímače měřící množství znečišťujících látek v ovzduší a snímače, pomocí kterých lze monitorovat jejich šíření.

Jelikož veškeré informace potřebujeme automaticky zpracovávat, zaznamenávat a přenášet, muselo být zvoleno měření všech veličin pomocí elektronických zařízení. To je rozdíl oproti měření veličin Českým hydro-meteorologickým ústavem, který i dnes využívá zařízení, kde je třeba informaci odečítat fyzicky na měřidle.

Vzhledem k dostupným zařízením a po konzultaci s panem doc. Ing. Petrem Jančíkem Ph.D. z katedry Ochrany životního prostředí v průmyslu, byly vybrány pro měření tyto veličiny:

- teplota,
- vlhkost,
- částice PM10,
- oxid uhelnatý.

Teplota

Na meteorologických stanicích se teplota měří různými způsoby. Do dnes se však využívá měření pomocí rtuťových a lihových teploměrů, které fungují na principu roztažnosti látek. V meteorologické buňce se měří 5 různých teplot a to aktuální, maximální a minimální teplota, teplota rosného bodu a přízemní teplota.

Elektronický teploměr v letounu je založen na závislosti změny odporu, při změně teploty. Přístroj měří pokles proudu, který je přímo úměrný velikosti odporu a tím zjistí aktuální teplotu [13].

Vlhkost

Vlhkost vzduchu vyjadřuje množství vodních par na jednotku objemu. Tento údaj je vyjádřen buď **absolutně** v $mg \cdot m^{-3}$ a je to početně a měřením dokázaný obsah vody ve vzduchu, anebo **relativně**, což je v procentech vyjádřený poměr aktuální vlhkosti vzduchu vůči maximální vlhkosti daného vzduchu, tzv. stav nasycení.

Měřit můžeme vlhkost třemi způsoby a to buď vlhkoměrem, elektrolyticky anebo psychometricky.

V letounu pracuje přístroj na principu roztažnosti látek, podobně jako ve vlhkoměru. Různé látky ze za dané vlhkosti různě roztahují. Přístroj tyto informace porovnává a z nich tak vyhodnocuje relativní vlhkost vzduchu [13].

Částice PM10

Jedná se o pevné částice rozptýlené ve vzduchu, které jsou tak malé, že mohou být vzduchem unášeny. Název PM10 představuje anglické spojení **particulate matter** (pevné částice) o velikosti menší než **10 μm** . Na lidský organizmus má škodlivý vliv, protože vdechování pevných částic poškozuje kardiovaskulární a plicní systém.

Měření množství pevných částic ve vzduchu je nejproblémovější druh analýzy ovzduší. Musí se brát v potaz charakter částic, proudění v uzavřeném profilu, vliv gravitace a další faktory [12].

Na meteorologických stanicích se měření provádí gravimetrickou metodou. Zjednodušeně jde o princip filtrování vzduchu a měření hmotnosti usazených částic daného rozměru za jednotku času. Nepřesnost tohoto měření se pohybuje mezi 10-20% (ČSN ISO 9096).

Snímač na letounu pracuje na jiném principu. Otvor snímače, kterým proudí měřený vzduch, snímají infračervené diody, které počítají částice. Tento údaj se následně opravuje o složku dopředné rychlosti [15].

Oxid uhelnatý

Je to bezbarvý plyn bez chuti a zápachu, nedráždivý. Je lehčí než vzduch, ale se vzduchem se mísí. Ve vodě je málo rozpustný. Vzniká při nedokonalém spalování fosilních paliv a biomasy. Uvolňuje se i při jiných procesech jako je například fotolýza anebo při sopečné činnosti. Pro zdraví člověka je velmi nebezpečný, jelikož znemožňuje červeným krvinkám přenášet kyslík do tkání.

Pro měření koncentrace oxidu uhelnatého v ovzduší se používají různé metody. Využívá se například infračervené spektrometrie, elektrochemických a termochemických analyzátorů a další metody.

Přístroj v letounu pracuje na principu zahřívání polovodiče. V případě přítomnosti oxidu uhelnatého se polovodič ohřívá nepřímo-úměrně proudu, který jej žhaví. Tato informace se opravuje o aktuální teplotu a vlhkost okolí. Z výsledku je pak určena aktuální koncentrace CO ve vzduchu. [14]

Snímač	Měřicí rozsah	Druh informace	Četnost měření za minutu	Přesnost
Teplota	-40°C +123,8°C	napěťová 0-5 V	1800	0,4°C
Vlhkost	0 - 100 % relativní vlhkosti	napěťová 0-5 V	480	3,0 % relativní vlhkosti
CO	1000 ppm (nastavitelný)	napěťová 0-5 V	300	100 ppm
PM10	0-500 $\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-3}$	napěťová 0-5 V	60	50 $\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-3}$

Tabulka 5.1 – Parametry snímačů [13, 14, 15]

5.3. Výběr vhodné technologie pro přenos dat

Všechny naměřené údaje je třeba nejen zaznamenávat, ale zároveň i přenášet na pozemní stanici, aby mohl být průběžně vyhodnocován stav ovzduší a operativně reagovat. Současně se přenáší také video obraz z palubní kamery a telemetrické údaje ze systému autopilota, které pilotovi poskytují doplňující informace potřebné k řízení letu na větší vzdálenosti nebo za snížené viditelnosti. V neposlední řadě je potřeba přenášet samotné povely řízení z ovladače **Spektrum DX8**.

Jak je již z těchto informací patrné, jedná se o poměrně nesourodé data, a proto pro jejich přenos bude využito na letounu více technologií. Data byla rozdělena do 3 skupin, pro které budeme volit vždy tu nejvhodnější.

Datové skupiny:

- **Řízení,**
- **telemetrie systému autopilota,**
- **video a meteorologická data.**

Je jasně patrné, že přenos některých údajů má vyšší prioritu než jiný. Proto si přenos můžeme rozdělit také do skupin podle důležitosti.

Pořadí důležitosti datových skupin

1. **Telemetrie systému autopilota** – na první místo byla zařazena telemetrii autopilota proto, že i při výpadku řízení, je autopilot schopen letu a přistání. Autopilot tyto manévry zvládne i bez komunikace s pozemní stanicí, z důvodu bezpečnosti a alespoň částečných korekcí je ale výhodné mít tuto komunikaci vždy navázanu. Dále tato komunikace bude sloužit pro lety a měření na větší vzdálenosti, kdy už pilot nebude mít letadlo v dohledu a nebude tak mít možnost manuálně letoun ovládat.
2. **Řízení** – na druhém místě je řízení letounu před přenosem videa a meteorologických dat. Je to z toho důvodu, že meteorologická data je třeba sbírat systematicky. Naměřená data, ale na nesprávných místech budou dávat zavádějící informaci.
3. **Video a meteorologická data** – na posledním místě je přenos video signálu a meteorologických dat. Není to z důvodu, že by tyto informace nebyly důležité, právě naopak. Celý letoun a systém je vytvořen primárně k měření znečištění přízemní vrstvy atmosféry. Je ale jasné, že bude mít vždy větší důležitost, aby byl letoun ovladatelný a mohl měření zopakovat v případě výpadku přenosu meteorologických údajů. Dalším významným faktorem, který tuto skupinu zařadil

na poslední místo je záznam veškerých údajů do vnitřní paměti letounu, čili i v případě výpadku přenosu dat v reálném čase nebudou tyto data ztracena, ale bude možno je vyhodnotit po přistání.

5.3.1. Základní požadavky na přenos dat

Při výběru přenosových technologií pro jednotlivé skupiny si nejprve musíme stanovit požadavky, které na daný přenos klademe.

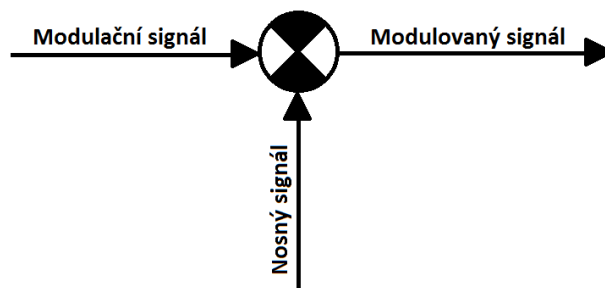
Dosah

Největší dosah musíme zabezpečit, jak je patrné již z pořadí důležitosti, pro přenos telemetrie systému autopilota. Ten by se měl pohybovat v řádu několika kilometrů. Je také jasné, že v této datové skupině nebude docházet k přenosu objemných dat, jako tomu bude například ve skupině video a meteorologická data.

Řízení by se mělo pohybovat někde na hranici viditelnosti modelu o dané velikosti, což odpovídá vzdálenosti okolo 1km.

Přenos videa a meteorologických dat bychom samozřejmě chtěli na co nejdelší vzdálenost, zároveň však musíme brát v potaz objem přenášených dat, což nám zamezuje využít nízké frekvence.

Dosah signálu značně ovlivňuje zvolené přenosové pásmo. Platí, že vysílání na nižší frekvenci se lépe šíří v prostoru a naopak. Pro vysílání na vysoké frekvenci a větší vzdálenosti již musíme signál směřovat. Z principu modulace signálu však víme, že nosná frekvence signálu musí být vždy vyšší, než frekvence modulační. Z tohoto zároveň vyplývá, že pro přenos většího množství informací budeme potřebovat vyšší frekvence.



Obrázek 5.1 – Princip modulace

Legislativa [10]

Při volbě vhodné technologie pro přenos dat musíme brát v potaz také nařízení Českého telekomunikačního úřadu (ČTU) které ve **všeobecném oprávnění č. VO-R/10/04.2012-7** popisuje využití vymezených radiových kmitočtů. Napříč celým kmitočtovým spektrem jsou totiž rezervovány pásma pro různé druhy komunikace, ať už pro šíření televizního signálu, pro leteckou komunikaci, komunikaci složek integrovaného záchranného systému a další. Z celého spektra tak můžeme veřejně využít jen některá pásma.

5.3.2. Doplnkové požadavky na přenos dat

Základními požadavky byla stanovena ta prvotní kritéria, jako byl dosah a vymezení kmitočtového pásma. Toto však nejsou jediné požadavky, které na přenosové soustavy klademe.

Snadnost na ovládání

U celého letounu se snažíme, aby byl co možná nejvíce autonomní. Tytéž požadavky tedy klademe na všechny jeho součásti, tedy i přenosové soustavy. V ideálním případě by tak měly být na letounu i pozemní stanici **všesměrové antény**, které by pokryly celou měřenou oblast.

Energetická náročnost

Je jasné, že energetické zdroje letounu jsou omezené palubními akumulátory. Pro napájení letounu se používají dva.

Primární (Li-pol 11.1V 3700mAh) – napájí veškerou elektroinstalaci letounu (akční členy řízení, přijímače a vysílače, měřicí přístroje, kameru, řídicí desky, systémy telemetrie a systém autopilota)

Sekundární (Li-pol 7.4 2400mAh) – napájí pouze systémy řízení (přijímače a vysílače pro přenos řídicích povelů, telemetrie a systém autopilota)

Z tohoto důvodu si nemůžeme dovolit využívat vysoké vysílací výkony, které by měly velkou spotřebu elektrické energie a musíme volit kompromis.

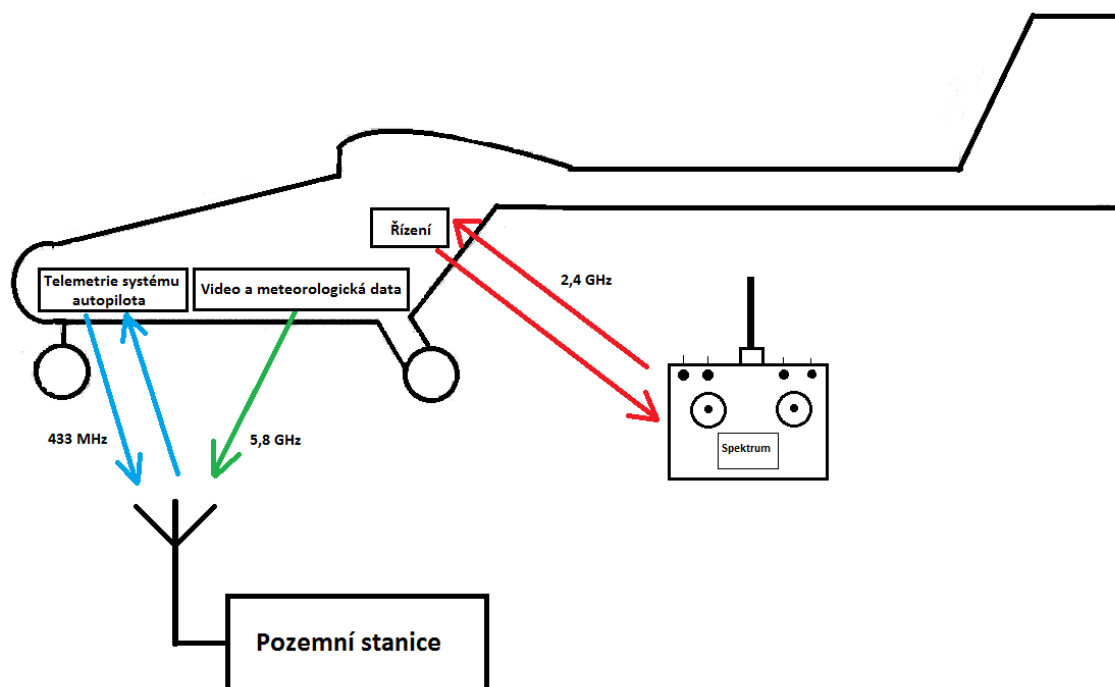
5.4. Návrh vhodné technologie pro přenos dat

Dle základních a doplňkových požadavků byly pro jednotlivé skupiny zvoleny tyto frekvence a druh přenosu.

Řízení – 2,4 GHz

Telemetrie systému autopilota – 433 MHz

Video a meteorologická data – 5,8 GHz



Obrázek 5.2 – Schéma komunikace

Řízení

Pro řízení byl zvolen systém Spektrum DX8, který pracuje v pásmu **ISM 2,4GHz**. Tento systém využívá kanálově oddělených přenosů a tedy i v případě práce více ovladačů na této frekvenci v bezprostřední blízkosti nedochází k vzájemnému ovlivňování komunikace v jednotlivých kanálech. V tomto pásmu pracuje například také WiFi IEEE 802.11. Kdybychom však využili této technologie, která využívá také více kanálovou komunikaci, mohlo by dojít k rušení a tak je využití této technologie vyloučeno [10].

Dosah zvoleného systému je dostatečný. Ve volném prostoru bylo při testování dosaženo vzdálenosti 1,5 km, což daleko překračuje dohlednost pilota a zajišťuje potřebnou bezpečnost. V případě výpadku a následného obnovení spojení je vždy rychle navázána komunikace. Protože se signál na této frekvenci dobře šíří, využívá se všesměrových antén jak na letounu, tak na ovladači.

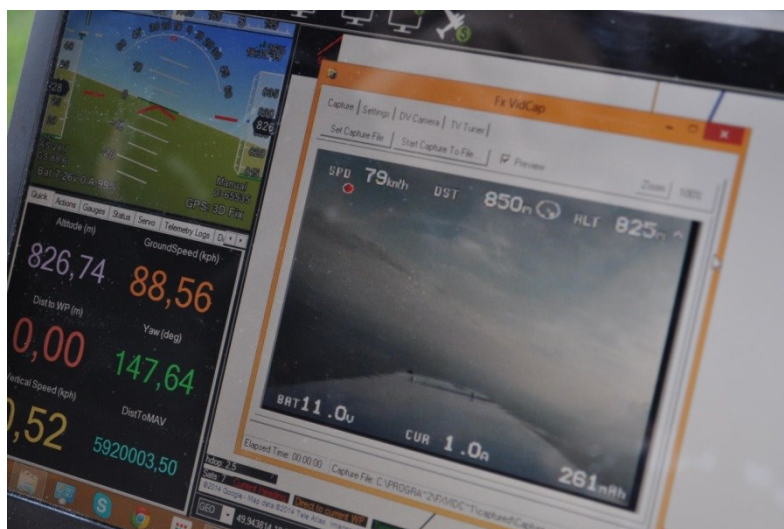
Telemetrie systému autopilota

Pro přenos telemetrických údajů a povelů pro systém autopilota využíváme pásmo **433 MHz**, které ČTU vyhrazuje pro „nespecifikované stanice sloužící zejména pro telemetrii, dálkové ovládání, signalizaci a přenos poplachových informací“[7].

Toto pásmo bylo zvoleno s ohledem na všeobecné oprávnění k využívání vymezených radiových kmitočtů č. VO-R/10/04.2012-7, a také s ohledem na druh přenášených dat.

Přenášena budou pouze jednoduchá data jako informace o poloze a stavu letounu, rychlosti, výšce, kurzu a další základní informace ze systému autopilota. Tato data nejsou nijak objemná, ale musí být přenášena na velké vzdálenosti. Z tohoto ohledu je využití nižší frekvence 433MHz ideální s ohledem na dobré prostorové šíření [11].

Hlavní nevýhodou tohoto pásma je však omezení vysílacího výkonu na 10mW dle ČTU.



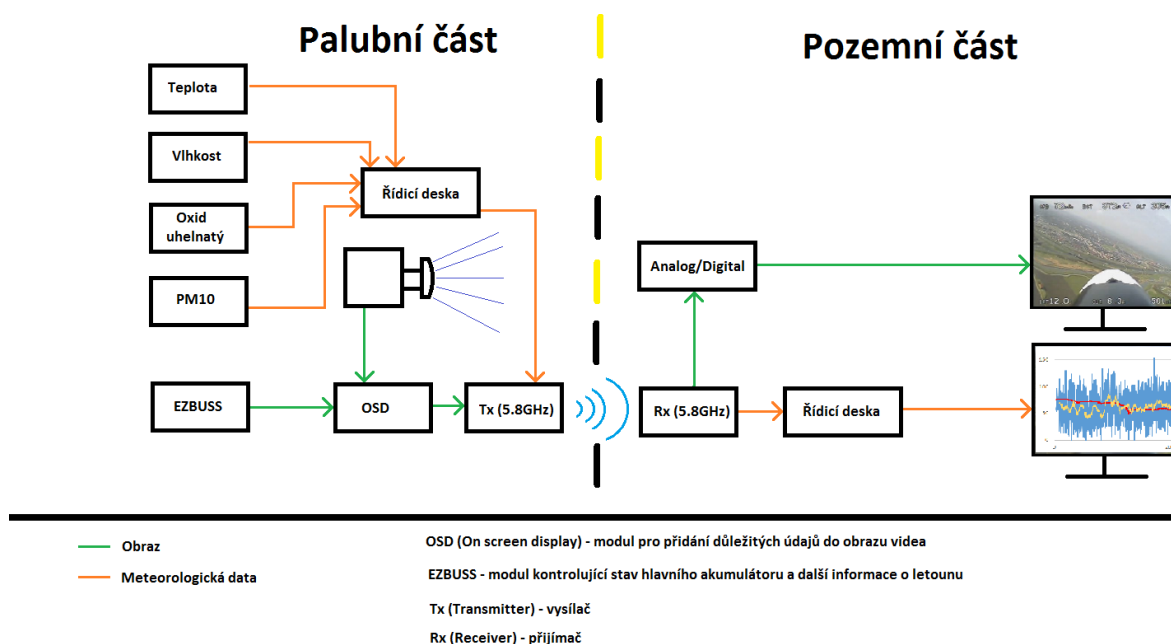
Obrázek 5.3 – Systém telemetrie autopilota

Video a meteorologická data

Největším problémem bylo zvolit technologii pro přenos videa a meteorologických dat. Nejen, že tato skupina bude oproti jiným přenášet daleko větší datový tok, ale také proto, že musíme předejít rušení obou předešlých datových skupin, což nám značně omezuje volbu vhodné frekvence a technologie.

Díky požadavku na přenos videa z palubní kamery musíme dodržet podmínky o všeobecné oprávnění č. VO-R/10/04.2012-7 k využívání rádiových kmitočtů a k provozování zařízení krátkého dosahu, článek 3 bod 6) „**Přenos obrazových informací je možný pouze na kmitočtech nad 2400 MHz**“ [7].

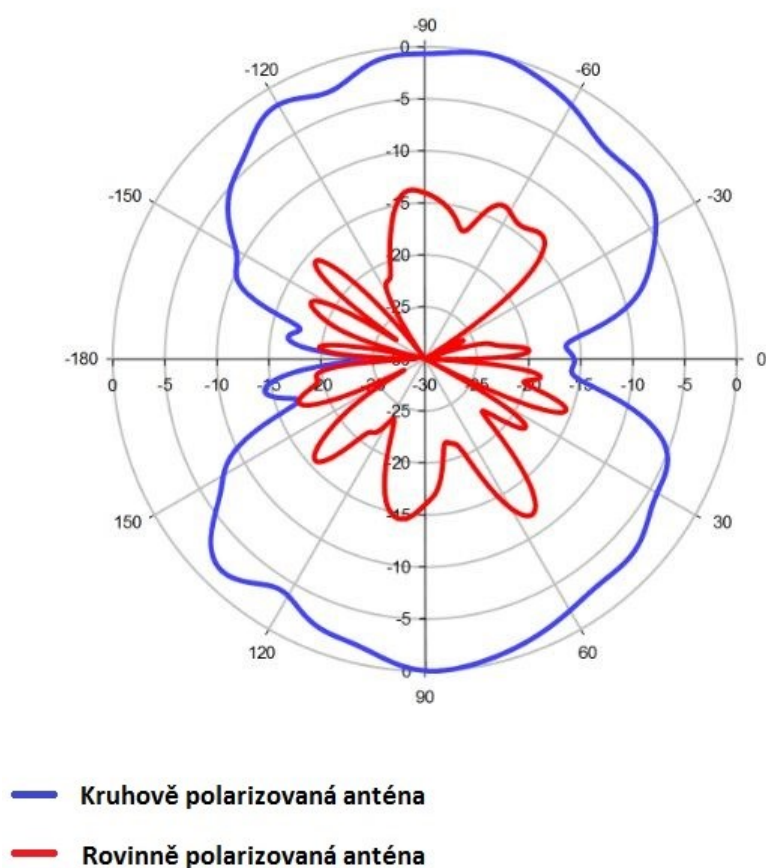
Z výše uvedeného bylo pro tuto datovou skupinu zvoleno pásmo **5,8 GHz**, což zabezpečuje frekvenční oddělení od předešlých skupin, dostatečnou frekvenci nosného signálu pro přenos většího objemu dat a splňuje výše citované nařízení ČTU.



Obrázek 5.4 – Schéma přenosu videa a meteorologických dat

Volbou daného pásma však vznikl problém s dosahem. Praktické testy a předešlé zkušenosti ukázaly, že při použití všesměrových antén a omezeném vysílacím výkonu na 25 mW, se dosah v otevřeném prostoru pohyboval v rozmezí 100-200 m. Tento problém byl odstraněn použitím nové technologie antén (viz. Obrázek 5.6).

Technologie **Circular Wireless**, která byla vyvinuta speciálně pro přenos obrazových dat z letících objektů, využívá kruhově polarizovaných všesměrových a směrových antén. Tyto antény jsou však velmi tolerantní, co se týče přesnosti směřování. Dosah všesměrových vysílacích antén se pohybuje kolem 1,5 km a dosah přijímací směrové antény okolo 5 km [8].



Obrázek 5.5 – Porovnání zisku kruhově polarizované antény oproti běžné anténě[9]

Tyto antény značně zvýšili dosah signálu a tak zabezpečili kvalitnější přenos. Směrová anténa Circular Wireless je viditelná na obrázku 5.6 a detailní záběry antén jsou v příloze 7.

5.5. Realizace přenosových soustav

Po zvolení daných technologií muselo být vše zakomponováno do UAS (viz. Příloha 1). To znamenalo nejen dovybavit letoun, ale také vybavit kompletně pozemní stanici pro příjem a zpracování dat. Na obrázku 5.6 je vidět část pozemní stanice.



Obrázek 5.6 – Přenosové antény

5.5.1. Testování přenosu dat

Testování přenosu bylo provedeno nejprve v laboratoři, kde se nám podařilo úspěšně spojit všechny tři datové skupiny.

Další testování probíhalo na modelářském letišti v Hati, kde byly jednotlivé datové skupiny přidávány postupně, abychom ověřili vzájemné rušení.

Fáze zprovoznění datových skupin

1. Řízení
2. Řízení + telemetrie systému autopilota
3. Řízení + telemetrie systému autopilota + video a meteorologická data

Tímto bylo ověřeno nejen, že se systémy vzájemně neruší, ale také mohla být díky tomu reálně ověřena spotřeba elektrické energie celého letounu.

5.5.2. Přizpůsobení danému modelu UAS

Zavedení těchto nových technologií představuje potřebu konstrukčně přizpůsobit letoun tak, aby byl využit plný potenciál přenosu. Toho bylo dosaženo umístěním antén na spodní část trupu, kde budou za letu nejčastěji směřovány k pozemní stanici. Umístění je patrné na obrázku 5.7.



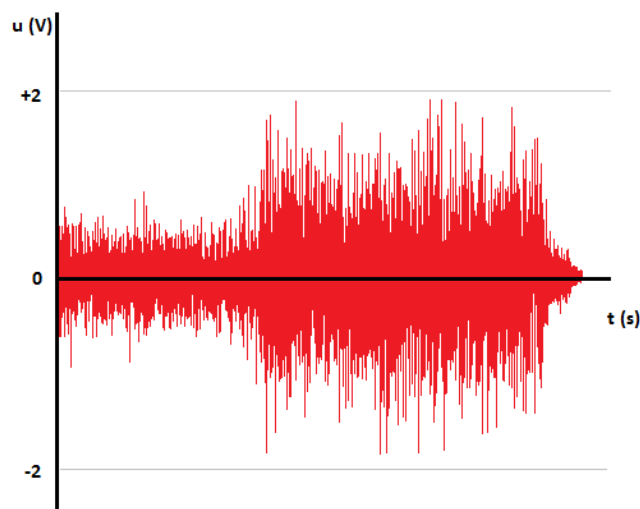
Obrázek 5.7 – Umístění antén

Také musela být konstrukčně upravena vnitřní část trupu. Ten musel být přizpůsoben většímu množství kabeláže, kterou sebou přenosové systémy přinesly.

Největší úpravy byly provedeny na způsobu přenosu meteorologických dat. Přenos na frekvenci 5,8 GHz byl primárně určen pro přenos obrazových a zvukových informací. Systém je vybaven třemi oddělenými přenosovými kanály standardu kompozit, což je analogový přenos video obrazu, levé a pravé složky zvuku.

Kanál pro přenos videa zůstal zachován beze změny, ale oba zvukové kanály byly využity pro přenos dat. Ty jsou totiž stavěny na amplitudovou i frekvenční modulaci

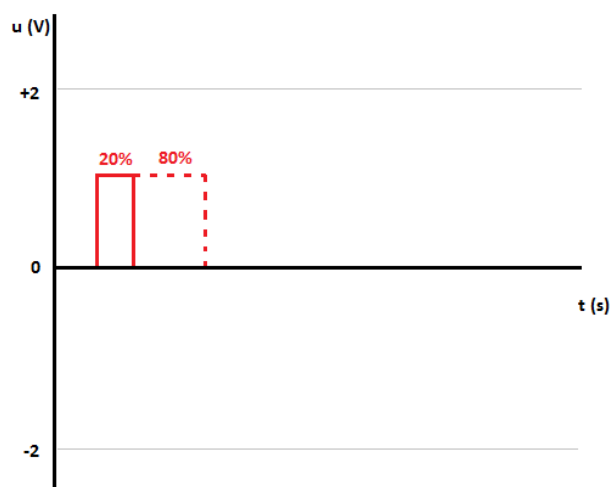
v rozmezí slyšitelného spektra 20 Hz – 20 kHz. Standard kompozit pracuje s napěťovou informací v rozmezí ± 2 V, jak jde vidět na obrázku 5.8.



Obrázek 5.8 – Zvuk kompozit audio

Tohoto bylo využito při tvorbě protokolu pro přenos meteorologických dat. Pro informaci z jednotlivých čidel byla zvolena pulzně-šířkovou modulaci obdélníkového průběhu, kde šířka střídy určuje naměřená data jednotlivých čidel v rozmezí 0-100%.

Jako příklad uvedeme toto použití na informaci z čidla snímající PM10. Měřicí rozsah čidla je $0 - 500 \mu g \cdot m^{-3}$, což pro nás představuje 0-100% měřicího rozsahu. Toto procentuální vyjádření převedeme na šířku střídy. Výsledek by pak vypadal takto.



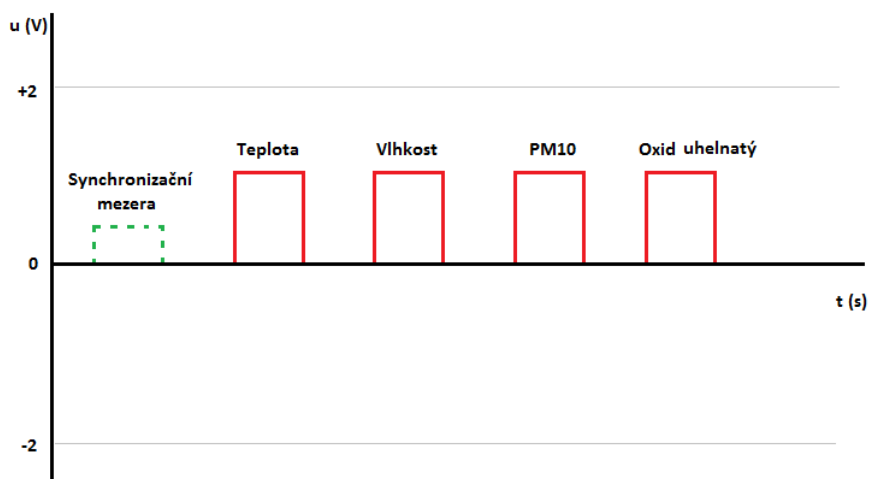
Obrázek 5.9 – Pulsně-šířková modulace

Z tohoto vyjádření jsme schopní jednoduchým výpočtem zjistit hodnotu znečištění.

$$x = \frac{500 \mu g \cdot m^{-3}}{100 \%} \cdot 20 \% = 100 \mu g \cdot m^{-3}$$

Je jasné patrné, že při takovémto procentuálním vyjádření nejsou údaje úplně přesné. Přesná data se však zapisují do paměti letounu a mohou být vyhodnocena po přistání. Pro operativní vyhodnocení však postačí i takovéto informace.

Pro přenos byla zvolena modulační frekvenci 10 kHz, což nám zajistí dostatečné množství informací i v případě drobných výpadků přenosu. Do přenosového protokolu tak zároveň můžeme vložit informaci ze všech čidel. Výstup jedné periody by pak vypadal takto.



Obrázek 5.10 – Přenosový protokol

Tento přenosový protokol bude nastaven jak v řídicí desce na palubě letounu, která bude provádět modulaci, tak v řídicí desce na pozemní stanici, která bude provádět následnou demodulaci a zobrazovat informaci na počítači.

5.6. Vyhodnocení zvolené technologie

Před testováním přenosových technologií byla nejprve provedena kalibraci metrologických snímačů na letounu. Kalibrace probíhala již se zastavěnými snímači v letounu, aby byly simulovány podmínky, kterým budou snímače reálně vystaveny za

letu. Proud vzduchu, kterým budou snímače za letu ofukovány, simuloval ventilátor o průměru 80 mm s konstantním **průtokem vzduchu $47,6 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$** . Kalibrace probíhala dne 15. 4. 2014 na stanici **Českého hydrometeorologického ústavu** v Ostravě – Porubě jak je vidět na obrázku 5.11.



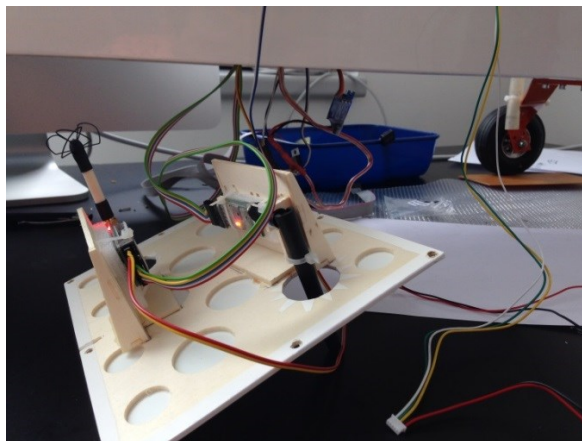
Obrázek 5.11 – Kalibrace snímačů na ČHMÚ

Během této kalibrace byly informace ze snímačů zaznamenávány **každou sekundu po dobu 4 hodin**. Následné porovnání s daty, které nám poskytl ČHMÚ, ukázalo, že maximální odchylka dat ze snímačů v letounu se pohybovala do **6 %**, jak je vidět v příloze 8.

Dále byly v laboratoři testovány přenosové technologie, jak je vidět na obrázku 5.12. Pro všechny datové skupiny se bez sebemenších problémů podařilo navázat komunikaci. Následné letové testování proběhlo také bez problémů. Zkušební pilot jevil nejprve nedůvěru ve druhé fázi zapojení, kdy už povely řízení podléhaly korekcím autopilota, záhy se však potvrdilo, že autopilot je pro letoun jedinečným přínosem. Drobnými zásahy do řízení stabilizuje let, aniž by si pilot něčeho všiml.

Dosavadní letové zkoušky prokázaly, že dosah řízení a dosah přenosu videa a meteorologických dat překračoval hranici **1,5 km**, která byla limitující pro vizuální kontrolu letounu za manuálního řízení. Dosah telemetrie systému autopilota vykazoval ztrátu signálu už kolem **600 m**. Toto je zapříčiněno především omezením maximálního vysílacího výkonu na **10 mW**, dle ČTU, a také použitím antén s malým ziskem. Tyto

informace jsou totiž pro budoucí provoz nezbytné. Bez informací z telemetrie autopilota v reálném čase nelze provádět operativní změny při organizovaném měření znečištění atmosféry.



Obrázek 5.12 – Testování přenosu

Přenos videa a meteorologických údajů pomocí antén Circular Wireless předčil očekávání. Signál je silný a při částečném směřování pozemní antény nevykazoval jakékoli ztráty ani při vzdálenosti překračující 1,5 km.

5.7. Provedení opatření pro optimální práci s danou technologií

Při přenosu telemetrie autopilota bylo zaznamenáno výrazné omezení dosahu za použití stávajících antén. Tento problém bude vyřešen budoucí výměnou za antény s vyšším ziskem, jelikož vysílací výkon ovlivnit nemůžeme.

Další problém spočíval v nekvalitním upevnění přijímací jednotky na stativu za použití lepicí pásky. Tento nedostatek byl odstraněn vyrobením podpůrné desky, která nyní slouží k jednoduchému a pevnému uchycení na stativu.

6. Závěr

Bezpilotní prostředek prošel několika zkušebními lety, kde byly postupně kontrolovány funkce jednotlivých systémů a prostředek jako takový. Již během těchto letů se prokázala funkčnost a správně zvolená koncepce. Následné měřicí lety již zaznamenávaly konkrétní hodnoty znečištění na Karvinsku a v pohraničí s Polskem. Toto vyhodnocení dále ve své práci zpracovává kolega Zavacký. Jako příklad jsem uvedl v přílohách výsledky z měření v Karvině (viz. Příloha 2 – Naměřená data Karviná).

Některé systémy vykazovaly ze začátku různé potíže, především kvůli vibracím za letu. Tyto problémy jsou postupně odstraňovány a prostředek se tak stává hodnotným měřicím nástrojem s velkým potenciálem.

Všichni členové týmu pevně doufáme, že v budoucnu bychom se mohli setkat s poznatky o šíření znečištění a opatření, které byly díky tomu provedeny, právě na základě měření tohoto bezpilotního prostředku.

Na závěr bych chtěl říci, že práce na tomto projektu nebyla vůbec jednoduchá. Přes veškeré teoretické základy, které jsme získali během našeho studia, jsme se setkávali s velkou řadou oblastí, která pro nás byla zcela neznáma. Proto hodnotím tento projekt jako velký přínos a to nejen pro fakt, že jsme dali odborníkům do rukou nástroj pro lepší měření znečištění ovzduší, ale také proto, že jsme jako budoucí vysokoškolsky vzdělaní odborníci, byli konfrontováni s realitou při řešení daného úkolu. To nám dalo cenné zkušenosti nejen v dané problematice, ale hlavně v přistupování k řešení problému a práce v týmu.

7. Seznam použité literatury

- [1] KELLER, L. Učebnice pilota 2011: pro žáky a piloty všech druhů letounů a sportovních létajících zařízení, provozujících létání jako svou zájmovou činnost. 1. vyd. Cheb, 2011, 716 s. ISBN 978-80-86808-90-1.
- [2] KUSSIOR, Z. Typy leteckých motorů. [online]. [cit. 2014-04-18]. Dostupné z: <http://www.leteckemotory.cz/teorie/teorie-02.php>
- [3] Air quality plume detection and monitoring using UAVs and Unmanned rotorcraft. In: 2010 National Air Quality Conferences: Air Quality, Forecasting, Mapping, and Monitoring Communicating Air Quality. s. 28. Dostupné z: http://www.epa.gov/airnow/2010conference/naqc/forecasting/kosmatka_final.pdf
- [4] Obyčejně neobyčejný balon – meteorologický balon. In: Počasí [online]. 2014 [cit. 2014-04-29]. Dostupné z: <http://aaapocasi.cz/obycejne-neobycejny-balon-meteorologicky-balon/>
- [5] BIOLEK, D.: Datová komunikace. Skriptum FEI VUT Brno, 2002.
- [6] HAVLÍK, J.: Teorie přenosu. Učebnice VA Brno, U-1039, 1976.
- [7] Všeobecné oprávnění č. VO-R/10/04.2012-7 k využívání rádiových kmitočtů a k provozování zařízení krátkého dosahu. In: 127/2005 Sb. 2005. Dostupné z: http://www.ctu.cz/cs/download/oop/rok_2012/vo-r_10-04_2012-07.pdf
- [8] The ultimate 5.8GHz video link (and simpler options) explained. FPVLAB [online]. 2013 [cit. 2014-04-27]. Dostupné z: [http://fpvlab.com/forums/showthread.php?16395-THE-ULTIMATE-5.8GHz-VIDEO-LINK-\(AND-SIMPLER-OPTIONS\)-EXPLAINED](http://fpvlab.com/forums/showthread.php?16395-THE-ULTIMATE-5.8GHz-VIDEO-LINK-(AND-SIMPLER-OPTIONS)-EXPLAINED)
- [9] Circular Wireless [online]. 2014 [cit. 2014-04-27]. Dostupné z: <http://www.circular-wireless.com/en/>
- [10] DX8 DSMX Spektrum, AR8000, TM1000. [online]. [cit. 2014-04-27]. Dostupné z: <http://www.astramodel.cz/cz/katalog/spektrum/dx8-dsmx-spektrum-ar8000-tm1000-mod-1-4-p16284.html>
- [11] VOLNER, R.: Digitální technologie - elektronické přístrojové systémy, Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2007

[12] Skácel, F. - Tekáč, V.: Podklady pro Ministerstvo životního prostředí k provádění Protokolu o PRTR - přehled metod měření a identifikace látek sledovaných podle Protokolu o registrech úniků a přenosů znečišťujících látek v únicích do ovzduší, VŠCHT Praha, MŽP Praha, 2007

[13] Datasheet SHT1x: Humidity and Temperature Sensor IC. 2011. Dostupné z: http://www.sensirion.com/fileadmin/user_upload/customers/sensirion/Dokumente/Humidity/Sensirion_Humidity_SHT1x_Datasheet_V5.pdf

[14] TECHNICAL DATA MQ-135 GAS SENSOR. 2014. Dostupné z: <http://www.futurlec.com/Datasheet/Sensor/MQ-135.pdf>

[15] Datasheet SHARP GP2Y1010AU0F: Compact Optical Dust Sensor. 2006. Dostupné z: https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/gp2y1010au_e.pdf

8. Seznam příloh

Příloha 1 – Schéma zapojení.....	I
Příloha 2 – Naměřená data Karviná (27. 4. 2014)	II
Příloha 3 – Motorová zkouška (14. 2. 2014)	(na CD)
Příloha 4 – Zálet v Hati (24. 4. 2014)	(na CD)
Příloha 5 – Letový deník.....	IV
Příloha 6 – Přistání s poškozeným výfukem.....	(na CD)
Příloha 7 – Antény Circular Wireless	VI
Příloha 8 - Porovnání výstupů ČHMÚ a výstupu snímačů letounu - PM10	VII